ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 621.785: 669.14.018.29
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-106-118

Научная статья

Роль карбидов в формировании структуры и свойств сталей при импульсном лазерном облучении

Г.И. Бровер ✉, **Е.Е. Щербакова**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ brover@mail.ru

Аннотация
Введение. В современных научных публикациях не существует однозначного суждения и аргументированного металлофизического обоснования роли карбидной фазы облучаемых материалов в формировании требуемой структуры и достижении заданной степени упрочнения поверхностных слоев сталей при импульсной лазерной обработке, особенно, в зоне лазерной закалки из твердого (аустенитного) состояния. Решение этого вопроса имеет большое значение, так как позволяет обоснованно и целенаправленно конструировать требуемую структуру поверхностных слоев изделий разного функционального назначения с высокими эксплуатационными свойствами. Сложность и недостаточно подробная изученность процесса структурообразования в поверхностных слоях сталей при экстремальном тепловом воздействии импульсного лазерного излучения потребовали проведения серии металлофизических экспериментов по изучению тонкого строения сталей после скоростной высокотемпературной закалки. Целью данной статьи явилось получение, количественная оценка и критический анализ массива результатов металлофизических исследований и оценка степени влияния карбидной фазы на формирование структуры и свойств поверхностных слоев сталей в процессе импульсной лазерной закалки на разных режимах, то есть с оплавлением и без оплавления поверхности образцов.

Материалы и методы. В работе поверхностному лазерному облучению на установке «Квант 16» подвергались углеродистые и легированные инструментальные стали. Плотность мощности излучения составляла 70–200 МВт/м^2. При проведении металлофизических исследований использовались оптическая, сканирующая зондовая и электронная микроскопия; методы дифрактометрического, спектрального и дюрометрического анализа сталей до и после лазерной обработки.

Результаты исследования. Показано, что лазерная обработка сталей с плотностью мощности излучения 130–200 МВт/м^2 приводила к локальному изменению химического состава в лазерно-оплавленных зонах пятна, частичному или полному растворению присутствующих в облучаемом металле карбидов и к увеличению количества остаточного аустенита в оплавленных зонах до 40–60 %. Установлено, что на стали Р6М5 максимально возможная твердость облученных зон достигалась при растворении 30 % карбидов, на сталях 9ХС, ХВГ — 60–70 %. Показано, что при импульсном лазерном облучении с q=70–125 МВт/м^2, то есть без оплавления поверхности стали, вокруг включений карбидов под действием термо-деформационных напряжений на границах композиции «карбид – стальная матрица» формировались «белые зоны». Они обладали нетравимостью, дисперсностью строения и повышенной твердостью (10–12 ГПа). Определено, что максимальная твердость лазерно-закаленного металла в зонах лазерной закалки из твердого состояния достигалась в случае, если «белые зоны» занимали 40 % облученной области стали. Установлено, что дисперсность карбидов в этом случае составляла 0,5–1,5 мкм.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что для получения наилучшего сочетания твердости и вязкости облученных зон при лазерной обработке с оплавлением поверхности сталей разного химического состава необходимо растворить разное количество карбидов. Дисперсное строение лазерно-оплавленных зон стали, наряду с достаточно большим содержанием остаточного аустенита, предопределяют возможность повышения эксплуатационных характеристик облученных материалов, особенно в условиях действия внешних ударных нагрузок.

Анализ проведенных металлофизических исследований, облученных без оплавления поверхности сталей, позволил сделать вывод, что для получения высокой степени упрочнения необходимо и целесообразно обеспечить присутствие в структуре облучаемой стали определенного объема дисперсных карбидов. Формирующаяся при лазерной обработке без оплавления поверхности стали структурная композиция «белых зон» способствует получению уникального уровня эксплуатационных свойств.
Результаты выполненных исследований вносят вклад в теорию структурообразования сталей в условиях экстремального теплового воздействия, а также позволяют осуществлять рациональный выбор режимов поверхностной лазерной обработки изделий и гарантированно обеспечивать их работоспособность.

Ключевые слова: карбиды в стали, лазерное облучение, структура, свойства

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их усовершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Бровер Г.И., Щербакова Е.Е. Роль карбидов в формировании структуры и свойств сталей при импульсном лазерном облучении. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):106–118. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-106-118

Original article

The Role of Carbides in Forming the Steels Structure and Properties under Pulsed Laser Irradiation

Galina I. Brover ✉, **Elena E. Shcherbakova**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ brover@mail.ru

Abstract
Introduction. At present, in scientific publications, there is no unambiguous understanding and reasoned metal physical justification of the role of the carbide phase of irradiated materials in forming the required structure and achieving a given degree of hardening of surface layers of steels during pulsed laser treatment, especially in the zone of laser hardening from a solid (austenitic) state. The solution to this issue is of great importance, since it allows us to reasonably and purposefully design the required structure of surface layers of products of various functional purposes with high performance properties. The complexity and insufficiently detailed study of the process of structure formation in the surface layers of steels under extreme thermal effects of pulsed laser radiation required a series of metal physical experiments to study the fine structure of steels after high-speed high-temperature hardening. The aim of this article was to obtain, quantify and critically analyze the array of results of metal physical studies and to assess the degree of influence of the carbide phase on the formation of structure and properties of surface layers of steels in the process of pulsed laser hardening in different modes, that is, with and without melting the surface of the samples.
Materials and Methods. In the work, carbon and alloyed tool steels were subjected to surface laser irradiation at a Kvant 16 installation. The radiation power density was 70–200 MW/m^2. Optical, scanning probe and electron microscopy were used in conducting metal physical studies, as well as methods of diffractometric, spectral and durometric analysis of steels before and after laser treatment.
Results. It was shown that laser treatment of steels with a radiation power density of 130–200 MW/m^2 led to a local change in the chemical composition in the laser-fused areas of the spot, partial or complete dissolution of carbides present in the irradiated metal and an increase in the amount of residual austenite in the fused areas up to 40–60%. It was found that on P6M5 steel, the maximum possible hardness of the irradiated zones was achieved by dissolving 30% of carbides, on 9XC, HVG steels — 60–70%. It was shown that under pulsed laser irradiation with q=70–125 MW/m^2, that is, without melting the steel surface, "white zones" formed around carbide inclusions under the influence of thermo-deformation stresses at the boundaries of the "carbide – steel matrix" composition. They had irretrievability, dispersion of the structure and increased hardness (10–12 GPa). It was determined that the maximum hardness of laser-hardened metal in the zones of laser hardening from a solid state was achieved if the "white zones" occupied 40% of the irradiated area of steel. It was found that the dispersion of carbides in this case was 0.5–1.5 microns.
Discussion and Conclusion. The results of the conducted studies indicate that in order to obtain the best combination of hardness and viscosity of the irradiated zones during laser treatment with melting of the surface of steels of different chemical composition, it is necessary to dissolve different amounts of carbides. The dispersed structure of laser-fused

steel zones, along with a sufficiently high content of residual austenite, predetermine the possibility of improving the operational characteristics of irradiated materials, especially under conditions of external shock loads.
The analysis of the conducted metal physical studies irradiated without melting the surface of steels allows us to conclude that in order to obtain a high degree of hardening, it is necessary and expedient to ensure the presence of a certain volume of dispersed carbides in the structure of the irradiated steel. The structural composition of "white zones" formed during laser treatment without melting the steel surface contributes to obtaining a unique level of operational properties.
The results of the performed studies contribute to the theory of steel structure formation under conditions of extreme heat exposure and allow for a rational choice of modes of surface laser processing of products and their operability.

Keywords: carbides in steel, laser irradiation, structure, properties

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions for their improvement contributed to a significant improvement in the quality of this article.

For citation. Brover GI, Shcherbakova EE. The Role of Carbides in Forming the Steels Structure and Properties under Pulsed Laser Irradiation. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):106–118. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-106-118

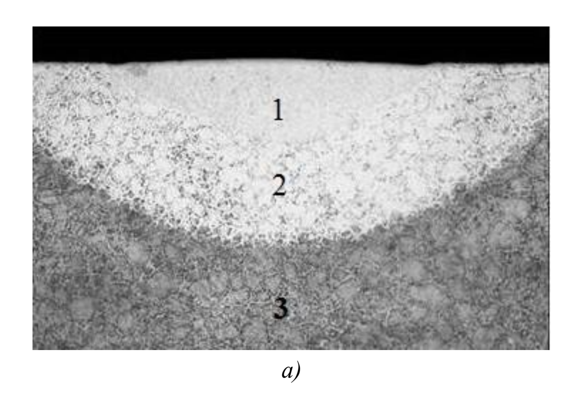
Введение. При импульсном лазерном облучении поверхностные слои материала подвергаются мощному тепловому «удару». В этих условиях появляются высокие градиенты температур, концентраций, а также поля напряжений — термострикционные, фазовые и др. Диссипация приобретенной материалом энергии может осуществляться следующим образом: частичная диссипация внешней энергии по дислокационному механизму путем локальной пластической деформации; диссипация упругой энергии по механизму массопереноса за счет перемещения атомов углерода и легирующих элементов из карбидов в контактирующие с ними твердые растворы к дефектам кристаллического строения и др. [1–4]. Следует отметить, что массоперенос, приводящий к локальному изменению химического состава лазерно-облученных зон стали, играет особенно важную роль в процессе структурообразования многофазных сталей и сплавов, содержащих значительный объем карбидной фазы. Растворение карбидов, даже частичное, влияет на строение и свойства поверхностных слоев сталей и изделий в целом [5–8].

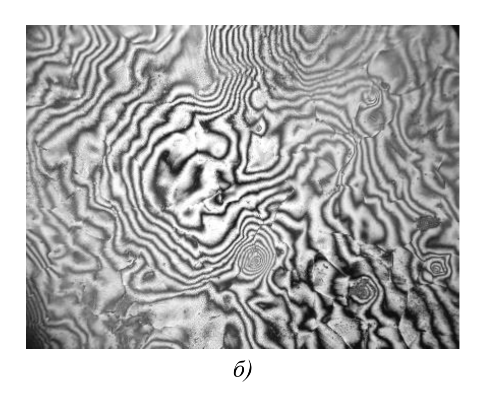
При скоростной лазерной обработке, то есть в условиях дефицита времени последствия растворения карбидов и ускоренного массопереноса могут наблюдаться только в лазерно-оплавленных зонах металла, на их границах с исходной сталью, в тонких областях вокруг карбидов [9–12]. Формирующиеся микроучастки с изменившимися химическим составом, структурой и свойствами имеют большое практическое значение, но недостаточно подробно изучены. Это ограничивает возможности для создания в поверхностных слоях сплава материала с заданной структурой и повышенными эксплуатационными характеристиками. Таким образом, целью данного исследования являлось определение влияние карбидной фазы на формирование структуры и свойств поверхностных слоев сталей в процессе импульсной лазерной закалки на разных режимах, то есть с оплавлением и без оплавления поверхности образцов.

Материалы и методы. Анализ процессов структурообразования в условиях скоростного лазерного нагрева проводился на образцах сталей У8 (ГОСТ 1435 99), Р6М5 (ГОСТ 19265–73), Р18 (ГОСТ 19265–73) и других, подвергнутых предварительной объемной закалке на мартенситную структуру и отпуску.

При проведении металлофизических исследований использовались оптическая, сканирующая зондовая и электронная микроскопия; методы дифрактометрического, спектрального и дюрометрического анализа сталей до и после лазерной обработки. Импульсное лазерное облучение проводилось на технологической установке «Квант-16» (Россия). Изменение энергии излучения, степени расфокусировки луча (3–6 мм), длительности импульса излучения (1–6) 10^{-3} с позволило варьировать плотность мощности излучения в широком диапазоне (70–200 МВт/м^2). Металлографические исследования проводились на поперечных и продольных шлифах на микроскопах МИМ-7 (Россия) и «Neophot-21» (Германия). Исследования тонкой структуры сталей, а также определение химического состава изучаемых зон облученных материалов проводились на сканирующих электронных микроскопах Hitachi TM-1000 (Япония) и Mira3 (Чехия). При рентгеноструктурном анализе использовался дифрактометр ДРОН-0,5 (Россия). Измерения микротвердости осуществлялись на приборе ПМТ-3 (Россия) с нагрузкой 0,49 Н.

Результаты исследования. Металлофизические исследования показали, что облученные зоны на сталях имеют гетерогенное строение по глубине упрочненного слоя. Как видно на рис. 1 *а*, при обработке с плотностью мощности излучения q=130–200 МВт/м^2 наблюдаются оплавленная зона закалки из жидкого состояния (1 — зона ЖС) и зона закалки из твердого состояния (2 — зона ТС).



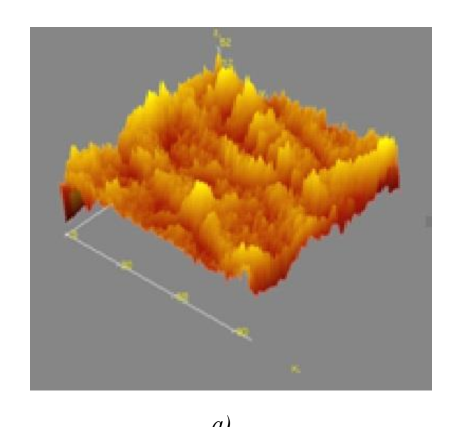


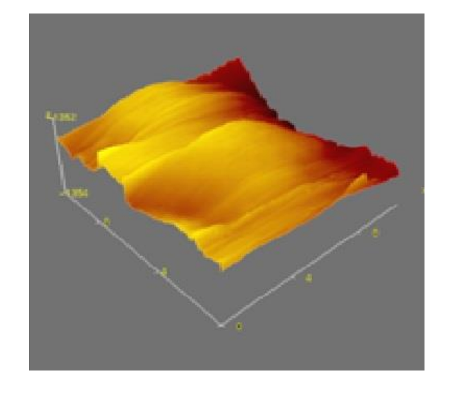
а) *б)*

Рис. 1. Микроструктура облученной стали Р6М5: *а* — 1 – зона ЖС,
2 — зона ТС, 3 — исходная сталь (×200);
б — конвективный процесс в зоне оплавления стали (интерференционная микроскопия) (×300)

Далее рассмотрены и описаны особенности формирования структуры и свойств в обеих зонах облученного пятна с учетом влияния на эти процессы присутствующей в сталях карбидной фазы.

Особенностями зоны ЖС являются ее нетравимость в обычных реактивах, дисперсность строения и высокая твердость (8–10 ГПа), а также заметное, даже при использовании оптической микроскопии, уменьшение объема исходной карбидной фазы. Несмотря на малое время воздействия лазерного импульса (10^{-3} с), этому способствуют высокая температура нагрева и конвективное перемешивание тонкого слоя жидкого металла, вызванное действием термострикционных напряжений (рис. 1 *б*). О частичном или полном растворении карбидов свидетельствуют результаты исследований на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) (рис. 2), которые наглядно демонстрируют, что растворение карбидов сглаживает рельеф поверхности около карбидов за счет массопереноса их компонентов в окружающую стальную матрицу.





а) *б)*

Рис. 2. Строение поверхностных слоев на стали Р6М5:
а — до лазерного оплавления (СЗМ); *б* — после лазерного оплавления (СЗМ)

Подтверждением возможности частичного растворения карбидов при скоростной лазерной закалке с оплавлением поверхности стали Р6М5 являются также результаты рентгеноструктурного анализа, приведенные на рис. 3.

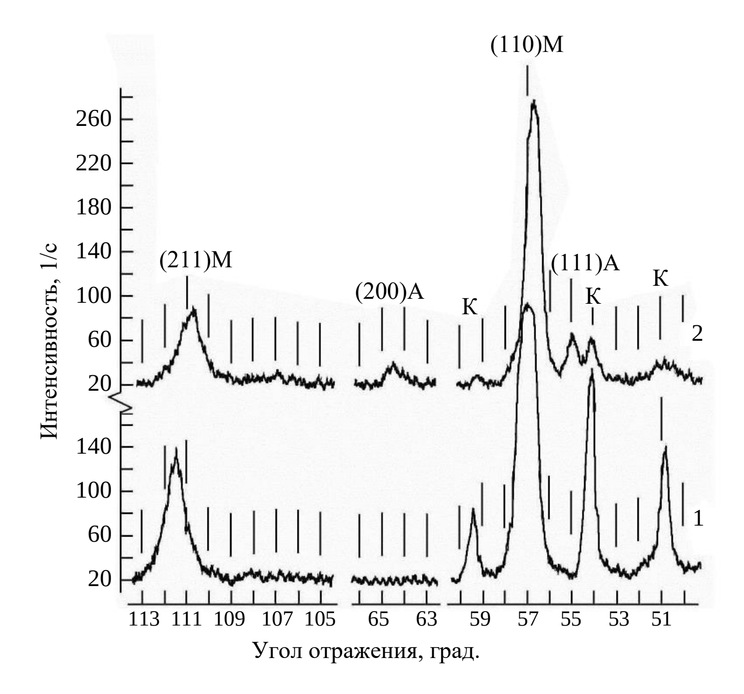
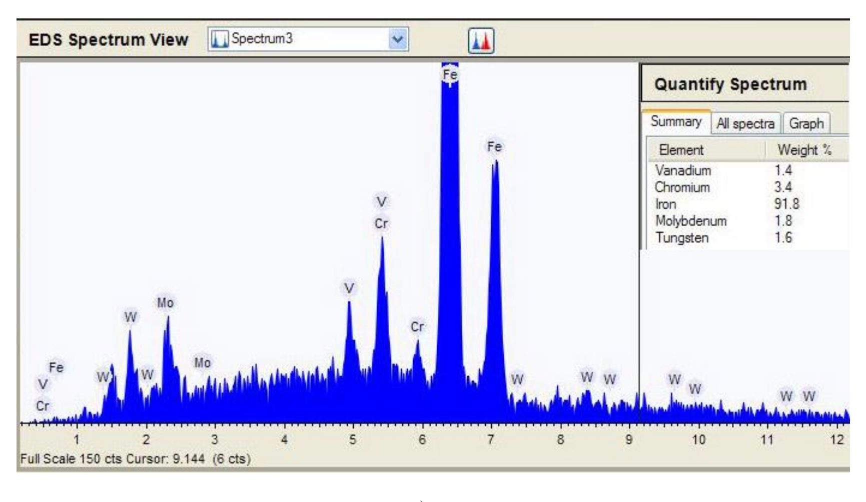


Рис. 3. Фазовый состав стали Р6М5 до (кр. 1) и после (кр. 2) лазерной обработки с оплавлением поверхности

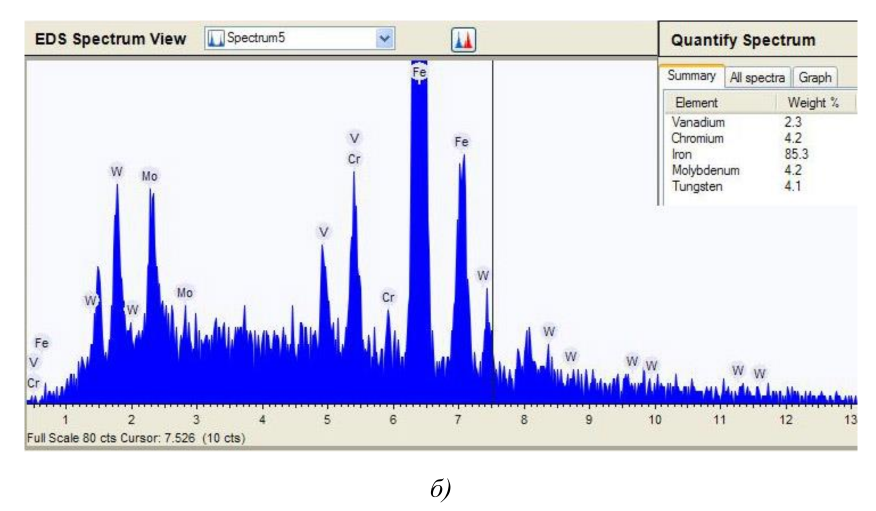
Как видно, лазерное оплавление поверхности стали приводит к уменьшению высоты рефлексов карбидной фазы (К). Их интенсивность изменяется от I=143,24 $с^{-1}$ в исходной стали (рис. 3, кр. 1) до I=65,38 $с^{-1}$ в зоне ЖС (рис. 3, кр. 2). Можно сделать вывод об уменьшении объемной доли карбидов в зоне ЖС. Изменяется также угол расположения карбидов на рентгенограмме. В оплавленной зоне рефлексы карбидов фиксируются на углах 2Q=54,1839 в сравнении с 2Q=54,1219 до лазерной обработки, то есть они смещаются к большим углам отражения. Эти результаты, а также увеличение физического расширения рефлексов карбидной фазы от 0,6392 мрад для исходного металла до 0,9000 мрад для зоны ЖС свидетельствуют об изменении стехиометрического состава карбидов, их частичном растворении и повышении плотности дефектов кристаллического строения.

Как видно на рис. 3, кривая 2, на дифрактограмме наблюдаются также рефлексы аустенита, а рефлексы мартенсита смещаются к меньшим углам отражения. Это является следствием появления участков с высокой насыщенностью атомами углерода и легирующих элементов, а также свидетельствует о высокой дисперсности тонкого строения фаз облученного металла.

На рис. 4 представлены результаты определения локального химического состава зоны лазерной обработки стали Р6М5 с оплавлением поверхности.



а)



б)

Рис. 4. Результаты спектрального химического анализа образцов стали Р6М5:
а — в исходном состоянии; *б* — после лазерной закалки

В результате изменения химического состава понижаются точки мартенситного превращения в зонах ЖС и в них сохраняется значительное количество (40–60 %) [13] остаточного аустенита, характеризующегося дисперсным строением [14–16].

Это оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства облученных изделий, особенно при воздействии внешних ударных нагрузок.

Результаты количественной оценки влияния объема растворившихся карбидов на степень упрочнения поверхностных слоев металла, полученные в ходе дюрометрических исследований облученных на разных режимах сталей, представлены на рис. 5.

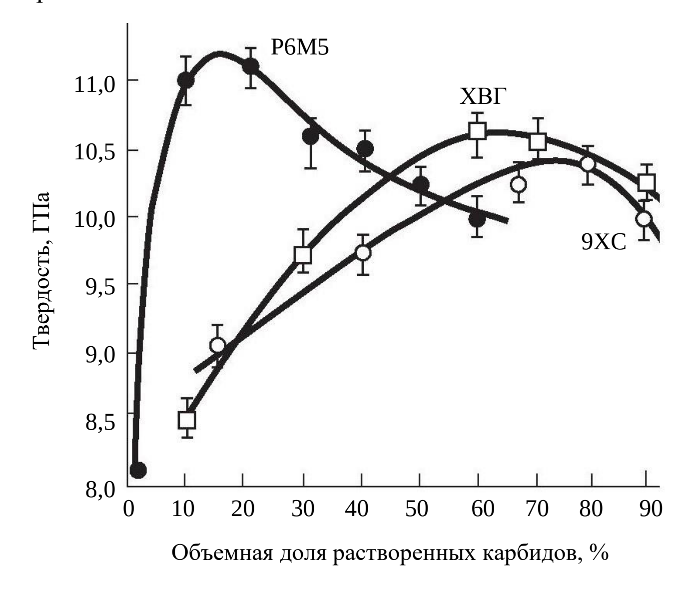
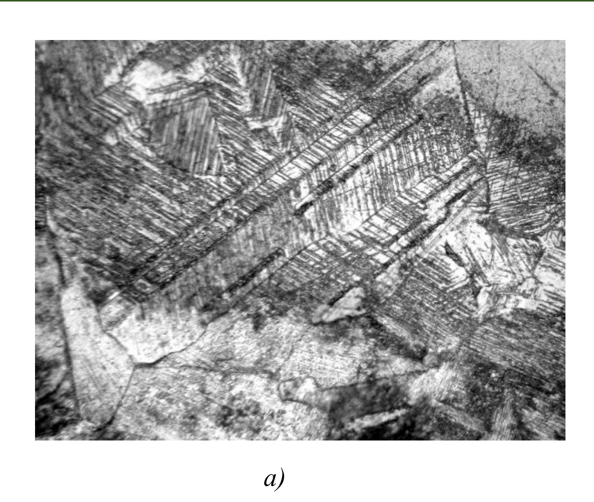
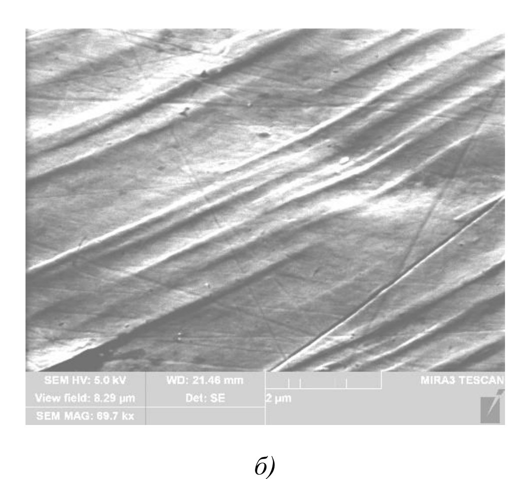


Рис. 5. Влияние объема растворившихся карбидов на микротвердость облученных сталей

Рассматривая влияние карбидной фазы на строение зоны ТС, необходимо учесть некоторые особенности процесса импульсного лазерного облучения материалов. Они обусловлены появлением в облучаемых зонах стали термострикционных напряжений, релаксация которых приводит к локальной пластической деформации, повышению плотности дефектов кристаллического строения, динамическому возврату, полигонизации и ранним стадиям рекристаллизации [17, 18]. Происходит также диспергирование структуры, ускорение массопереноса атомов элементов и упрочнение металла в зонах ТС. На рис. 6 представлены наглядные последствия влияния локальной пластической деформации на строение полированных образцов стали 12Х18Н9 после лазерной обработки. Хорошо видны следы деформации в виде линии или полос скольжения.





а) *б)*

Рис. 6. Двойники деформации после лазерной обработки стали 12Х18Н9:
а — оптическая микроскопия (×500); *б* — сканирующая электронная микроскопия (×10 000)

На рис. 7 приведена схема-реконструкция таких характерных структурных особенностей процессов полигонизации и рекристаллизации в зонах лазерной обработки, как формирование развитой субструктуры, измельчение зерен, формирование зерен вокруг включений и др.

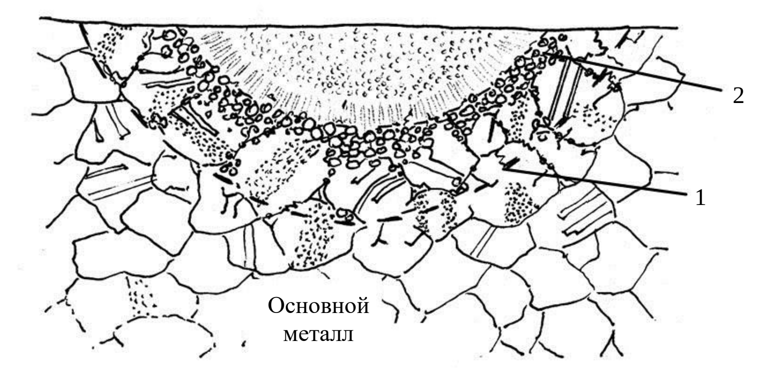
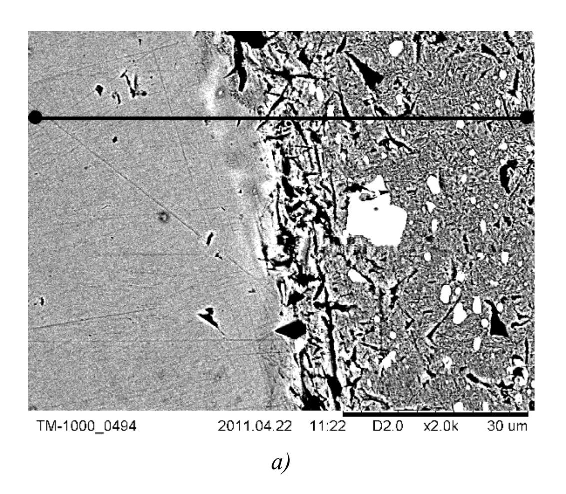
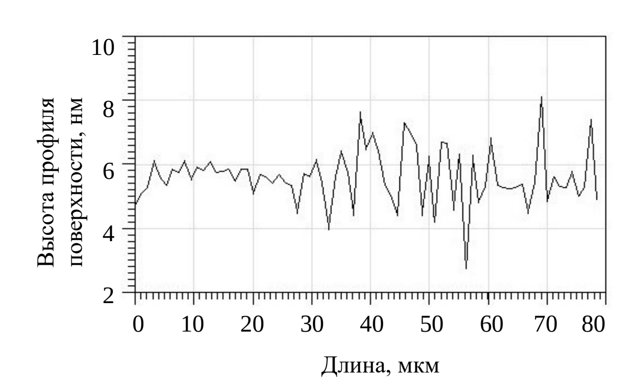


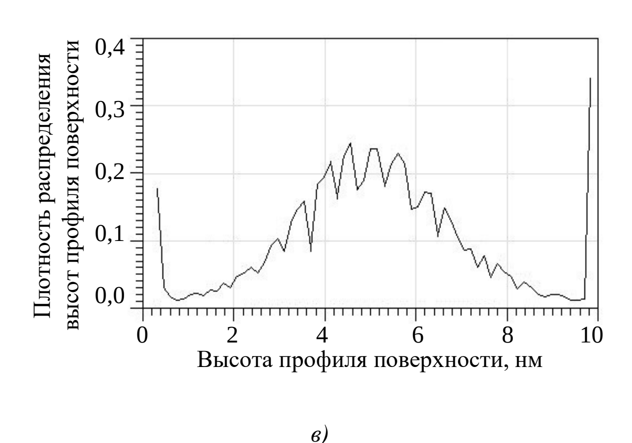
Рис. 7. Схема структурных признаков процессов полигонизации (1) и рекристаллизации (2) в зонах лазерного облучения

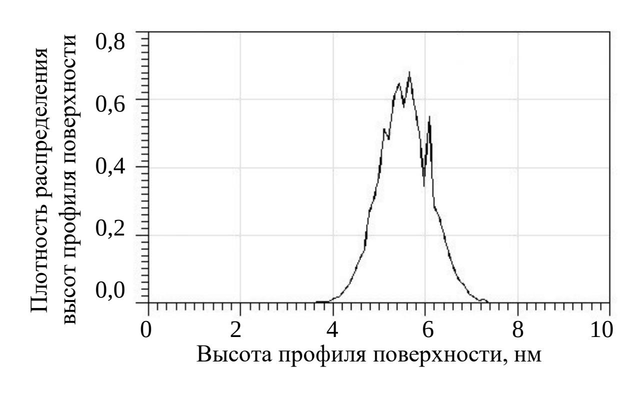
Как показали металлофизические исследования, зона лазерной закалки из твердого состояния (зона ТС) имеет дисперсную, плохо травящуюся структуру.





а) *б)*





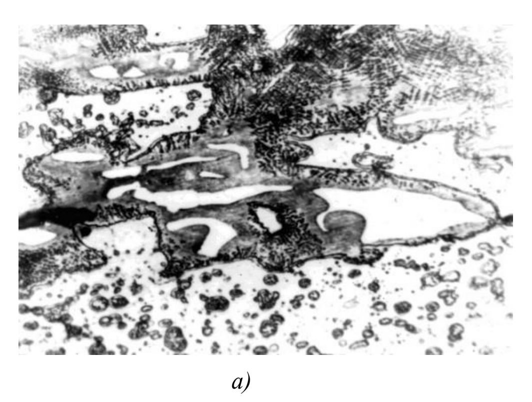
в) *г)*

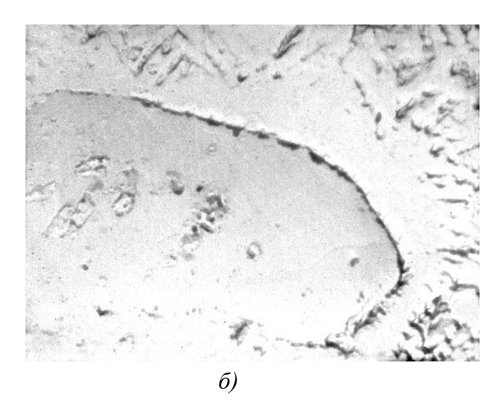
Рис. 8. Микроструктура на облученной стали Р6М5: *а* — профилограмма переходной зоны от исходного металла к зоне ТС; *б* — профилограмма полученная в программе Gwyddion; *в* — гистограмма распределения высот профиля поверхности в основном металле; *г* — гистограмма распределения высот профиля поверхности в зоне ТС

На рис. 8 приведены результаты исследований микроструктуры облученной стали Р6М5 на сканирующем электронном микроскопе.

Как видно, в зоне ТС не вытравливаются карбиды, профилограмма поверхности более ровная, чем в основном металле (рис. 8 *б*) и нет резких колебаний свойств на границах в композициях «карбид – стальная матрица».

Для подтверждения формирования вокруг включений карбидов светлых нетравящихся оболочек с ультрадисперсной структурой («белых зон») проведены металлографические исследования поверхности облученных без оплавления зон стали Р6М5 (рис. 9).

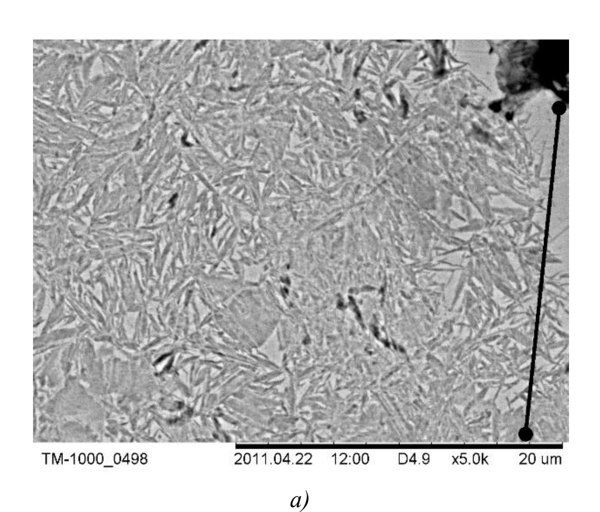


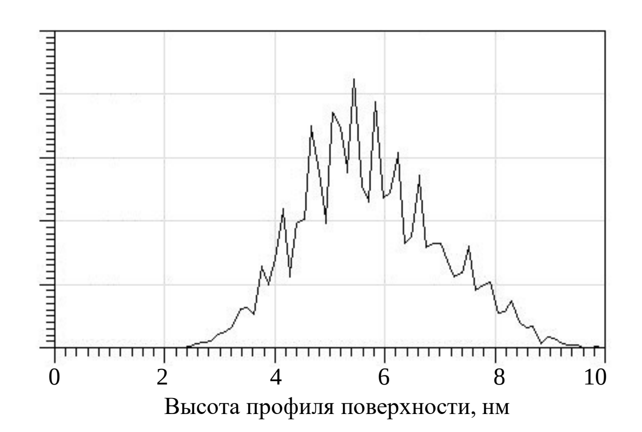


а) *б)*

Рис. 9. Приграничное растворение карбидов в облученных без оплавления зонах стали Р6М5:
а — металлографический микроскоп (×800); *б* — электронный микроскоп (×10000)

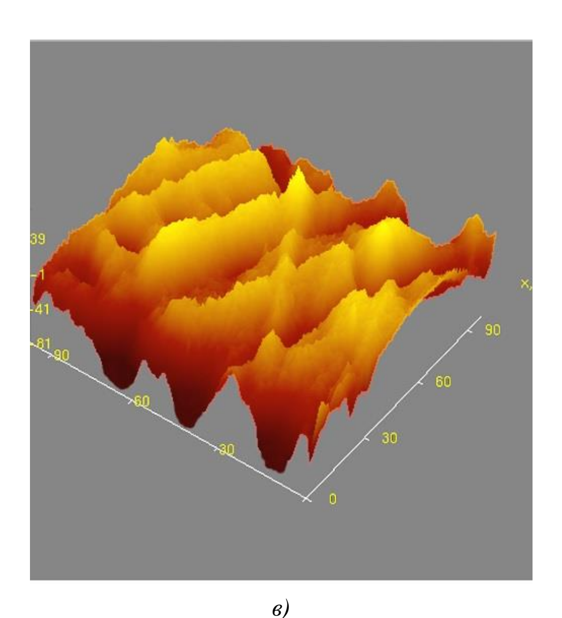
Исследования структуры «белой зоны» с использованием сканирующего зондового (СЗМ) и атомно-силового микроскопа (АСМ) (рис. 10 *а, в*) показали, что мартенситные кристаллы имеют вид тонких реек толщиной 4–7 нм и длиной ~150 нм [19] (рис. 10 *б*).





а) *б)*

Безопасность техногенных и природных систем. 2023;7(4):106–118. eISSN 2541−9129



в)

Рис. 10. Микроструктура мартенсита лазерной закалки стали Р6М5:
а — СЗМ *Hitachi TM*-1000; *б* — распределение высот профиля игл мартенсита;
в — АСМ — изображение строения «белой зоны»

С целью расширения знаний о тонком строении и свойствах зоны ТС были проведены скретч-тесты на установке Nanotest. Использовался зонд трения, оснащенный тензодатчиком, что позволило определить силу трения между индентором и образцом под действием тяжести калибровочных грузиков.

Обсуждение и заключение. Перечисленные особенности структурного состояния оплавленной зоны могут быть связаны с протеканием при скоростной лазерной обработке процесса динамической высокотемпературной пластической деформации. Это способствует фрагментации дендритной структуры облученных зон стали, ускоряет процессы массопереноса. Подтверждением сказанному является результат определения локального химического состава зоны лазерной обработки стали Р6М5 с оплавлением поверхности. Как видно на рис. 4 *б*, за счет растворения карбидов повышается общий фон интенсивности рефлексов легирующих элементов в сравнении с исходным (рис. 4 *а*) металлом.

На основании приведенных на рис. 5 результатов дюрометрических исследований облученных на разных режимах сталей можно сделать вывод, что для получения максимально возможной твердости при лазерной обработке стали Р6М5 достаточно растворить 30 %, а сталей 9ХС, ХВГ — 60–70 % исходных карбидов. Понижение твердости облученных зон с ростом объема растворившихся карбидов связано, видимо, с увеличением в этих условиях количества остаточного аустенита.

Следует отметить, что при эксплуатации облученных изделий под действием термо-деформационных нагрузок наблюдаемое на рис. 5 понижение твердости компенсирует выделяющееся из аустенита большое количество твердых дисперсных включений карбидов упрочняющего действия [20].

Анализ результатов сканирующей микроскопии поверхности металла показал, что в зоне ТС профилограмма более ровная, чем в основном металле (рис. 8 *б*) и нет резких колебаний свойств на границах в композициях «карбид – стальная матрица». Это свидетельствует о формировании на границах переходных микрообластей с измененным химическим составом. Как видно на рис. 8 *в*, *г*, металл в зоне ТС располагается выше над плоскостью шлифа. Высота профиля поверхности на исходной стали составляет 5,0 нм, а для лазерно-закаленной зоны — 5,8 нм.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что области металла в зоне ТС являются более твердыми и однородными, а также о возможном частичном растворении включений карбидов, которое начинается с границы раздела их со стальной матрицей. Подтверждением является фиксируемое при металлографических исследованиях формирование вокруг включений карбидов светлых нетравящихся оболочек с ультрадисперсной структурой («белых зон») (рис. 9 *а*), что особенно заметно при большом увеличении (рис. 9 *б*). Образованию таких «белых зон» при лазерной обработке сталей с плотностью мощности излучения 70–125 МВ т/м^2 способствуют появляющиеся на границах композиции «карбид – стальная матрица» напряжения разного рода: термострикционные, напряжения, обусловленные разными теплофизическими коэффициентами в композиции и др.

Микротвердость этих участков составляет 10–12 ГПа. Полученные величины твердости соответствуют твердости мартенсита легированных сталей. Можно сделать вывод, что нетравящаяся каемка около частичек карбидов представляет собой мартенсит лазерной закалки.

Сложную структурную картину, которая формируется вокруг включений в результате релаксации напряжений, предложено описать следующим образом. В первую очередь за счет контактного плавления в непосредственной близости от границ карбидов образуется тонкая оболочка жидкого металла, через которую атомы углерода и легирующих элементов из карбидов перемещаются к близлежащим твердым растворам облучаемого пятна. После кристаллизации вокруг карбидов возможно появление супертвердого аморфноподобного каркаса. В остальной части объема «белых зон» $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение при нагреве в экстремальных температурно-силовых условиях осуществляется по сдвиговому механизму. Это приводит к пластической деформации и динамической полигонизации аустенита с формированием фрагментированной субструктуры. В процессе скоростной закалки в аустенитной оторочке протекает $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение с наследованием мартенситом фрагментированного строения аустенита.

Результаты металлографических и дюрометрических исследований. показали, что максимальная твердость лазерно-закаленного металла в зонах ТС достигается в случае, если «белые зоны» занимают 40 % облученной области стали. Дисперсность карбидов должна составлять 0,5–1,5 мкм.

Установлено, что при царапании индентором основного металла стали Р6М5 наблюдаются колебания силы трения, вызванные перемещением индентора по неоднородной структуре, состоящей из фаз с разной твердостью. В зоне ТС лазерно-облученного металла значительных колебаний силы трения нет. Можно сделать вывод, что зона ТС относительно однородна по структуре и твердости, причем ее твердость значительно выше, чем твердость основного металла. Об этом свидетельствуют значения силы трения около 17 МН в сравнении с 11 МН для основного металла.

Анализ проведенных металлофизических исследований свидетельствует о том, что при лазерной обработке с плотностью мощности излучения 130–200 МВт/м^2, то есть с оплавлением поверхности сталей разного химического состава, получено наилучшее сочетание твердости и вязкости облученных зон при растворении разного количества карбидов. Вследствие зафиксированного дисперсного строения лазерно-оплавленных зон стали, наряду с достаточно большим содержанием в них остаточного аустенита, появилась возможность повышения эксплуатационных характеристик облученных материалов, особенно в условиях действия внешних ударных нагрузок.

Металлофизические исследования облученных с плотностью мощности излучения 70–125 МВт/м^2, то есть без оплавления поверхности сталей, позволили сделать вывод, что для получения высокой степени упрочнения в этом случае необходимо и целесообразно обеспечить присутствие в структуре облучаемой стали определенного объема дисперсных карбидов. Сформированная при лазерной обработке без оплавления поверхности стали структурная композиция «белых зон» способствовала получению уникального уровня эксплуатационных свойств.

Результаты выполненных исследований внесли вклад в теорию структурообразования сталей в условиях экстремального теплового воздействия, а также позволили осуществлять рациональный выбор режимов поверхностной лазерной обработки изделий разного функционального назначения для гарантированного обеспечения их работоспособности.

Список литературы

1. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. *Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов*. Самара: Издательство Сам. ун-т; 2001. 393 с.

2. Клебанов Ю.Д., Григорьев С.Н. *Физические основы применения концентрированных потоков энергии в технологиях обработки материалов.* Москва: Издательство МГТУ «Станкин»; 2005. 220 с.

3. Xinxin Li, Yingchun Guan. Theoretical fundamentals of short pulse laser – metal interaction: A review. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2020;3(3):105–125. https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.08.001

4. Gabdrakhmanov A., Galiakbarov A., Gaisin I. Increasing efficiency of the laser action to materials. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19(5):1965–1967. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.052

5. Brover A.V., Brover G.I., Topolskaya I.A. Wear resistance structural aspects of materials after laser processing. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;969: 012008. https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012008

6. Decheng Kong, Chaofang Dong, Xiaoqing Ni, Liang Zhang, Cheng Man, Guoliang Zhu, et al. Effect of TiC content on the mechanical and corrosion properties of Inconel 718 alloy fabricated by a high-throughput dual-feed laser metal deposition system. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019;803(1):637–648. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.317

7. Chengkuan Ma, Zhibin Xia, Yifeng Guo, Weifeng Liu, Xuhui Zhao, Qiang Li, et al. Carbides refinement and mechanical properties improvement of H13 die steel by magnetic-controlled electroslag remelting. *Journal of Materials Research and Technology. 2022;*19:3272–3286. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.090

8. Zia Ullah Arif, Muhammad Yasir Khalid, Ehtsham ur Rehman, Sibghat Ullah, Muhammad Atif, Ali Tariq. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications. *Journal of Manufacturing Processes.* 2021;68(B):225–273. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.041

9. Li Xing, Wang Quanjie, Zhang Qirui, Guan Yingchun, Zhou Wei. Interface analyses and mechanical properties of stainless steel/nickel alloy induced by multi-metal laser additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;91:53–60. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.038

10. Vimalraj S., Varahamoorthi R., Umesh Bala A., Karthikeyan R. Modeling and optimizing the laser parameters for corrosion resistance in 316 SS laser hardfaced surface using tungsten carbide. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26(2):2485–2490. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.529

11. Bo Li, Bo Qian, Yi Xu, Zhiyuan Liu, Jianrui Zhang, Fuzhen Xuan. Additive manufacturing of ultrafine-grained austenitic stainless steel matrix composite via vanadium carbide reinforcement addition and selective laser melting: Formation mechanism and strengthening effect. *Materials Science and Engineering: A.* 2019;745:495–508. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.008

12. Yong Chen, Hui Chen, JingQing Chen, Jun Xiong, Ying Wu , ShiYun Dong. Numerical and experimental investigation on thermal behavior and microstructure during selective laser melting of high strength steel. *Journal of Manufacturing*. 2020;57:533–542. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.041

13. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Richard H.A., Tröster T., Schwarze D. Highly anisotropic steel processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2013;44(4):794–796. https://doi.org/10.1007/s11663-013-9875-z

14. Michael Katancik, Saereh Mirzababaei, Milad Ghayoor, Somayeh Pasebani. Selective laser melting and tempering of H13 tool steel for rapid tooling applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;849:1563–1572. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156319

15. Brover G.I., Shcherbakova E.E. Aspects of structure formation in surface layers of steel after laser alloying from various coatings. *Metallurgist*. 2022;66:672–680. https://doi.org/10.1007/s11015-022-01375-2

16. Benarji K., Ravi kumar Y., Jinoop A.N., Paul C.P., Bindra K.S. Effect of WC composition on the microstructure and surface properties of laser directed energy deposited SS 316-WC Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(9):6732–6742. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05971-2

17. Brover A.V., Brover G.I., Moysova O.B. The role of local plastic deformation in the formation of structure and properties of materials under extreme heating. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;680(1):556–562. https://doi.org/10.1088/1757-899X/680/1/012019

18. Бровер А.В., Бровер Г.И. О протекании процесса рекристаллизации в быстрорежущих сталях при импульсном лазерном облучении. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2011;11(9):1601–1610. URL: https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/895/890 (дата обращения: 25.08.2023).

19. Pustovoit V.N., Dombrovskii Y.M., Dolgachev Y.V. Structural identification of the phenomenon of “white zone”. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017;59:3–7. https://doi.org/10.1007/s11041-017-0092-2

20. Brover A.V., Brover G.I. The morphology of carbide and nitride coatings on steels after laser irradiation. *Materials Science Forum.* 2020;989:145–151. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.145

References

1. Gureev DM, Yamshchikov SV. *Osnovy fiziki lazerov i lazernoi obrabotki materialov*. Samara: Samara University publishing house; 2001. 393 p. (In Russ.).

2. Klebanov YuD, Grigorev SN. *Fizicheskie osnovy primeneniya kontsentrirovannykh potokov energii v tekhnologiyakh obrabotki materialov.* Moscow: Publishing house of MSTU "Stankin"; 2005. 220 p. (In Russ.).

3. Xinxin Li, Yingchun Guan. Theoretical fundamentals of short pulse laser – metal interaction: A review. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2020;3(3):105–125. https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.08.001

4. Gabdrakhmanov A, Galiakbarov A, Gaisin I. Increasing efficiency of the laser action to materials. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19(5):1965–1967. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.052

5. Brover AV, Brover GI, Topolskaya IA. Wear resistance structural aspects of materials after laser processing. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;969: 012008. https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012008

6. Decheng Kong, Chaofang Dong, Xiaoqing Ni, Liang Zhang, Cheng Man, Guoliang Zhu, et al. Effect of TiC content on the mechanical and corrosion properties of Inconel 718 alloy fabricated by a high-throughput dual-feed laser metal deposition system. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019;803(1):637–648. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.317

7. Chengkuan Ma, Zhibin Xia, Yifeng Guo, Weifeng Liu, Xuhui Zhao, Qiang Li, et al. Carbides refinement and mechanical properties improvement of H13 die steel by magnetic-controlled electroslag remelting. *Journal of Materials Research and Technology. 2022;*19:3272– 286. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.090

8. Zia Ullah Arif, Muhammad Yasir Khalid, Ehtsham ur Rehman, Sibghat Ullah, Muhammad Atif, Ali Tariq. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications. *Journal of Manufacturing Processes.* 2021;68(B):225–273. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.041

9. Li Xing, Wang Quanjie, Zhang Qirui, Guan Yingchun, Zhou Wei. Interface analyses and mechanical properties of stainless steel/nickel alloy induced by multi-metal laser additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;91:53–60. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.038

10. Vimalraj S, Varahamoorthi R, Umesh Bala A, Karthikeyan R. Modeling and optimizing the laser parameters for corrosion resistance in 316 SS laser hardfaced surface using tungsten carbide. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26(2):2485–2490. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.529

11. Bo Li, Bo Qian, Yi Xu, Zhiyuan Liu, Jianrui Zhang, Fuzhen Xuan. Additive manufacturing of ultrafine-grained austenitic stainless steel matrix composite via vanadium carbide reinforcement addition and selective laser melting: Formation mechanism and strengthening effect. *Materials Science and Engineering: A.* 2019;745:495–508. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.008

12. Yong Chen, Hui Chen, JingQing Chen, Jun Xiong, Ying Wu, ShiYun Dong. Numerical and experimental investigation on thermal behavior and microstructure during selective laser melting of high strength steel. *Journal of Manufacturing*. 2020;57:533–542. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.041

13. Niendorf T, Leuders S, Riemer A, Richard HA, Tröster T, Schwarze D. Highly anisotropic steel processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2013;44(4):794–796. https://doi.org/10.1007/s11663-013-9875-z

14. Michael Katancik, Saereh Mirzababaei, Milad Ghayoor, Somayeh Pasebani. Selective laser melting and tempering of H13 tool steel for rapid tooling applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;849:1563–1572. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156319

15. Brover GI, Shcherbakova EE. Aspects of structure formation in surface layers of steel after laser alloying from various coatings. *Metallurgist*. 2022;66:672–680. https://doi.org/10.1007/s11015-022-01375-2

16. Benarji K, Ravi kumar Y, Jinoop AN, Paul CP, Bindra KS. Effect of WC composition on the microstructure and surface properties of laser directed energy deposited SS 316-WC Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(9):6732–6742. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05971-2

17. Brover AV, Brover GI, Moysova OB. The role of local plastic deformation in the formation of structure and properties of materials under extreme heating. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;680(1):556–562. https://doi.org/10.1088/1757-899X/680/1/012019

18. Brover AV, Brover GI. On recrystallization behaviour in high-speed steels under pulsed laser illumination. *Vestnik of Don State Technical University.* 2011;11(9):1601–1610. URL: https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/895/890 (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

19. Pustovoit VN, Dombrovskii YM, Dolgachev YV. Structural identification of the phenomenon of “white zone”. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017;59:3–7. https://doi.org/10.1007/s11041-017-0092-2

20. Brover AV, Brover GI. The morphology of carbide and nitride coatings on steels after laser irradiation. *Materials Science Forum.* 2020;989:145–151. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.145

Поступила в редакцию 03.09.2023
Поступила после рецензирования 24.09.2023
Принята к публикации 25.09.2023

Об авторах:

Галина Ивановна Бровер, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8344-3147, ORCID, Author ID, Scopus, brover@mail.ru

Елена Евгеньевна Щербакова, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 9842-0007, ORCID, Author ID, Researcher ID, Scopus, sherbakovaee@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г.И. Бровер — постановка задачи, выбор методов и методик исследований, планирование экспериментов, участие в проведении металлофизических исследований и в обсуждении их результатов.

Е.Е. Щербакова — критический обзор литературных источников по теме исследования, участие в проведении металлофизических экспериментов и в обсуждении их результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 03.09.2023
Revised 24.09.2023
Accepted 25.09.2023

About the Authors:

Galina I. Brover, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 8344-3147, ORCID, Author ID, Scopus, brover@mail.ru

Elena E. Shcherbakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 9842-0007, ORCID, Author ID, Researcher ID, Scopus, sherbakovaee@mail.ru

Claimed contributorship:

GI Brover: problem statement, selection of research methods and techniques, planning of experiments, participation in metal physical researches and their results discussion;

EE Shcherbakova: critical review of literature sources on the topic of research, participation in metal physical experiments and their results discussion.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.